

水平式ADCP流量在线监测在弥陀寺水文站的应用研究

李 强, 魏林云, 周 莉, 王 琴

长江水利委员会水文局荆江水文水资源勘测局, 湖北 荆州

Email:778464278@qq.com

收稿日期: 2021年8月2日; 录用日期: 2021年9月23日; 发布日期: 2021年10月8日

摘要

弥陀寺水文站通断流频繁, 水位流量关系不稳定, 利用连时序绳套法定线复杂, 所需流量测次较多。为解决此类问题, 开展水平式声学多普勒流速剖面仪(简称H-ADCP)比测试验。通过H-ADCP测验数据与传统流速仪法流量资料的对比分析, 采用代表流速法, 挑选具有代表性的H-ADCP流速单元与断面平均流速建立相关关系, 考虑测验断面冲淤变化情况, 确定断面流量推算方案, 并对方案进行精度评定, 以达到水文站流量在线监测的目的。

关键词

H-ADCP, 转子式流速仪, 比测分析, 流速关系率定

Application of H-ADCP System On-Line Monitoring in Mituosi Hydrological Station

Qiang Li, Linyun Wei, Li Zhou, Qin Wang

Jingjiang Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Jingzhou Hubei
Email:778464278@qq.com

Received: Aug. 2nd, 2021; accepted: Sep. 23rd, 2021; published: Oct. 8th, 2021

Abstract

Affected by the adjustment of water conservancy projects, the Mituosi Hydrological Station has an unstable relationship between water level and flow discharge. The use of loop-rating curve is complicated and needs many measurements. To solve this problem, the H-ADCP System on-line monitoring and compari-

作者简介: 李强, 湖北荆州人, 出生于 1991 年 11 月, 大学本科, 工程师, 研究方向为水文测报及水资源分析研究。

文章引用: 李强, 魏林云, 周莉, 王琴. 水平式 ADCP 流量在线监测在弥陀寺水文站的应用研究[J]. 水资源研究, 2021, 10(5): 480-490. DOI: 10.12677/jwrr.2021.105052

son test was carried out. Through the comparative analysis of H-ADCP test data and rotating element current-meter data using index flow rate method, we select representative H-ADCP flow velocity unit, establish the average flow velocity of the section correlation, consider the changes in the erosion and deposition of the test section, determine the flow calculation plan of the section, evaluate the accuracy of the plan, and achieve the purpose of on-line monitoring of the flow discharge.

Keywords

H-ADCP, Rotating-Element Current-Meter, Comparative Measurement Analysis, Velocity Relation Calibration

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

1.1. 测站概况

弥陀寺站建于 1952 年 6 月，是长江四口之一太平口分流虎渡河入洞庭湖的基本控制站，属国家级重点站，为长江三峡工程服务，为荆江河段及洞庭湖防洪、水资源合理调配、河道整治提供水文资料。目前流量测验方法为水文缆道流速仪法测流，受水利工程调节影响，该站通断流频繁，流量测次布置较多，水位流量关系采用连时序绳套定线复杂。

1.2. 断面特征

流速仪法流量测验断面在基本水尺断面下游 5 m，上游河段较为顺直，下游 600 m 有弯道。主槽为单式断面，呈 V 型，宽 274 m，相对稳定，一般年份洪水主要是在主槽内，河床为泥沙组成。右岸高程 33.00 m 以上有人工护坡，高程 45.00 m 以上有水文站挡水墙保护，左岸子堤高程约 45.00 m，在水位 45.00 m 以上时开始漫滩，洲滩宽约 350 m，有农作物生长。

1.3. 水文特征

弥陀寺站历史最高洪水位 44.90 m，历史最低水位 31.57 m，历史最大流量 3210 m³/s，历史最小流量 0。

2. 比测试验与资料收集

2.1. 试验目的和内容

弥陀寺站水位流量关系受影响因素较多，年内水位涨落和通断流频繁、水位流量关系复杂、流量测次较多，导致测验生产成本大、职工外业劳动强度高，不利于水文巡测工作的开展。为进一步改进流量测验和资料整编工作，在弥陀寺站安装水平式 ADCP，开展流量比测试验，逐步实现流量在线监测，最大限度地减轻外业劳动强度，节省人力物力，进一步推动水文巡测工作的开展，2017 年 7 月起，开始 600 KHz H-ADCP 比测试验和资料分析工作，以便达到以下目的：

- 1) 确定 H-ADCP 在弥陀寺站相关测验参数的设置，选取代表流速区间、建立代表流速和断面平均流速相关关系、确定流量推算方案；
- 2) 探索 H-ADCP 在荆江河段不同水力条件和水流特性下，设备测验适用条件和适用范围，为其它站点推进流量在线监测开展试验研究；

2.2. H-ADCP 流量推算模型

ADCP 流量推算原理是利用 H-ADCP 所测得代表流速，与常规流速仪法所测得的断面平均流速建立相关关系，通过推算得到的代表流速与相应水位下大断面面积来计算流量，这种通过 H-ADCP 实测代表流速间接推求断面流量方式称为代表流速法[2]，基本原理如下：

$$Q = A \times V \quad (1)$$

$$A = f \times (H) \quad (2)$$

$$V = f \times (V_i) \quad (3)$$

式中： Q 为断面流量， m^3/s ； A 为相应水位下大断面面积， m^2 ； V 为断面代表流速， m/s ； H 为水位或水深， m ， V_i 为选取的代表流速， m/s 。

率定出代表流速与断面平均流速相关关系后，从 H-ADCP 在线监测数据中提取代表流速计算代表流速，即可推求断面流量，实现流量在线监测。

2.3. 仪器安装与参数设置

弥陀寺水文站 H-ADCP，安装在右岸基本水尺断面上游 3.0 m 处，安装高程为 35.05 m，起点距 78.5 m，固定安装在特制的倾斜式双轨滑槽上，具体参数设置为：最小单元长度 1.0 m，单元数量 80 个，盲区 1.00 m，盐度 0，采样时间间隔 12 s，数据平均时段 300 s，电源供电采用蓄电池直流供电，电压保证在 12 v 以上，H-ADCP 每 12 s 采集一个原始数据，设置平均时段为 5 min，即将 5 分钟内的数据进行平均处理后输出，以消除水流脉动导致的瞬时流速跳变情况。仪器稳定运行期间，纵摇变化范围为 $0.06^\circ\sim0.08^\circ$ ，横摇变化范围为 $0^\circ\sim0.02^\circ$ 。断面形状、安装位置及测量范围如图 1、图 2 所示。

2.4. 比测方法

弥陀寺水文站 H-ADCP 测验断面在基本水尺断面上游 3 m 处，缆道流速仪测验断面位于基本水尺断面下游

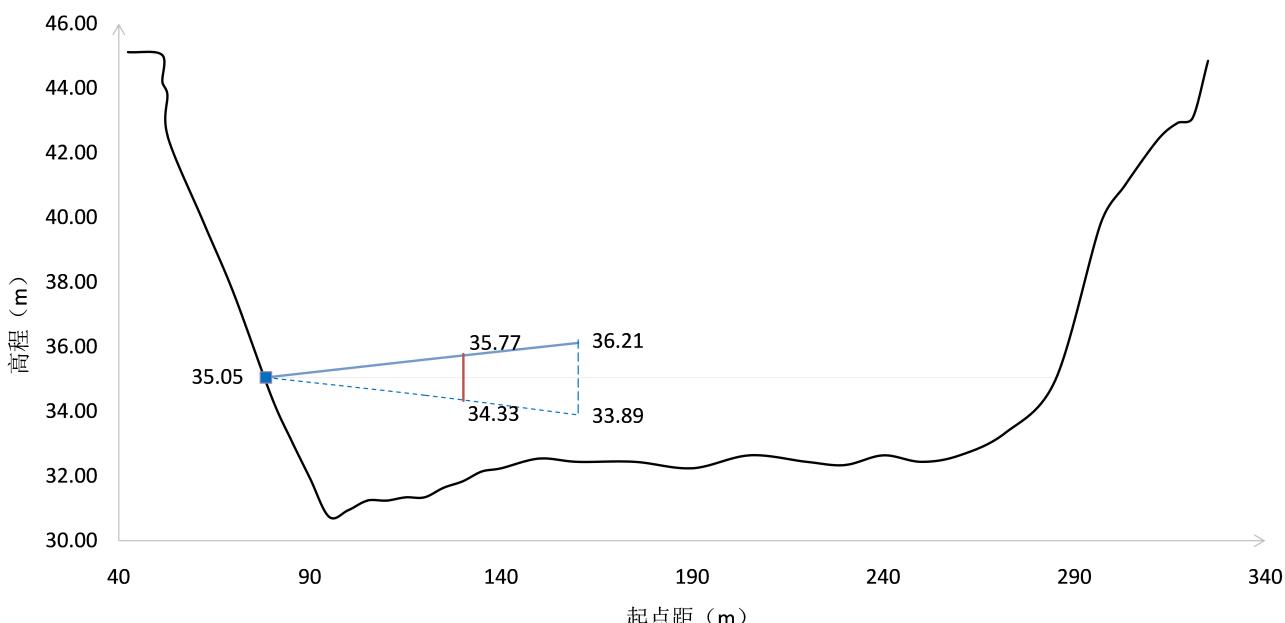


Figure 1. Schematic diagram of large cross-section shape and instrument installation position

图 1. 大断面形状、仪器安装位置示意图

**Figure 2.** H-ADCP installation diagram

图 2. H-ADCP 安装示意图

5 m, H-ADCP 测验断面与流速仪测验断面相距 8 m。因此,在开展缆道流速仪测验时,铅鱼入水不会对 H-ADCP 收集数据产生影响。

取流速仪测验开始时间与结束时间为比测时段,流量测验水位直接采用 YAC9900 固态存储数据,取开始时间与结束时间所对应的水位进行平均,即为本次比测相应水位。同时摘取比测时段内 H-ADCP 每 5 min 采集的各个代表流速值,取其平均值作为比测代表流速 V_i 。

2.5. 资料收集

考虑到 H-ADCP 水位数据部分样本偏差较大,而 H-ADCP 安装位置与本站基本水尺断面距离仅有 3 m。因此,为排除 H-ADCP 水位可能出现的偏差对流量计算的影响,弥陀寺站比测分析所使用的水位数据全部采用本站基本水尺断面处 HS/40(3100)压力式水位监测的水位数据。

弥陀寺站水文缆道流速仪法测流一般情况垂线流速测量采用二点法测速。当测速垂线离岸边太近或太远,及时对测速垂线进行调整或补充。2020 年全年根据水情变化过程合理布置流量测次,同时根据水位变幅适时增加比测测次,缆道流量测验过程中, H-ADCP 同步收集比测资料。一般情况下,除设备维护外, H-ADCP 全天 24 h 运行,收集固定测验断面代表流速数据。

2.6. 资料成果

弥陀寺站 H-ADCP 比测时间为 2020 年 7 月 3 日至 2020 年 10 月 7 日。在此期间,共收集流量比测资料 63 次,如表 1 所示。比测期间,水位变幅为 35.26~43.10 m,流量变幅为 64.0~1750 m³/s。回放 H-ADCP 测验数据,从第 50 单元开始,两波束探头回波强度拟合效果较差,因此, H-ADCP 代表流速分析只采用第 1 单元~第 50 单元内(起点距 80.2~130 m)的数据。受三峡工程调蓄减小下泄流量和洞庭湖涨水严重顶托双重影响,7 月 6 日至 7 月 13 日期间,弥陀寺水文站水情特殊,在此期间测次不做为比测样本。8 月 21 日起,测验河段含沙量增大,H-ADCP 测量范围受到影响,通过分析发现,当含沙量达到 0.300 kg/m³ 时, H-ADCP 采集单元区间数以及区间流速开始受到影响,当含沙量达到 0.350 kg/m³,区间流速影响范围涉及 50 个以内区间单元,如图 3 所示,随着含沙量逐步减小至 0.350 kg/m³ 及以下,影响程度也相应减小直至恢复正常。鉴于以上情况,8 月 21 日至 9 月 1 日期间测次不纳入正常情况下代表流速相关关系的率定。

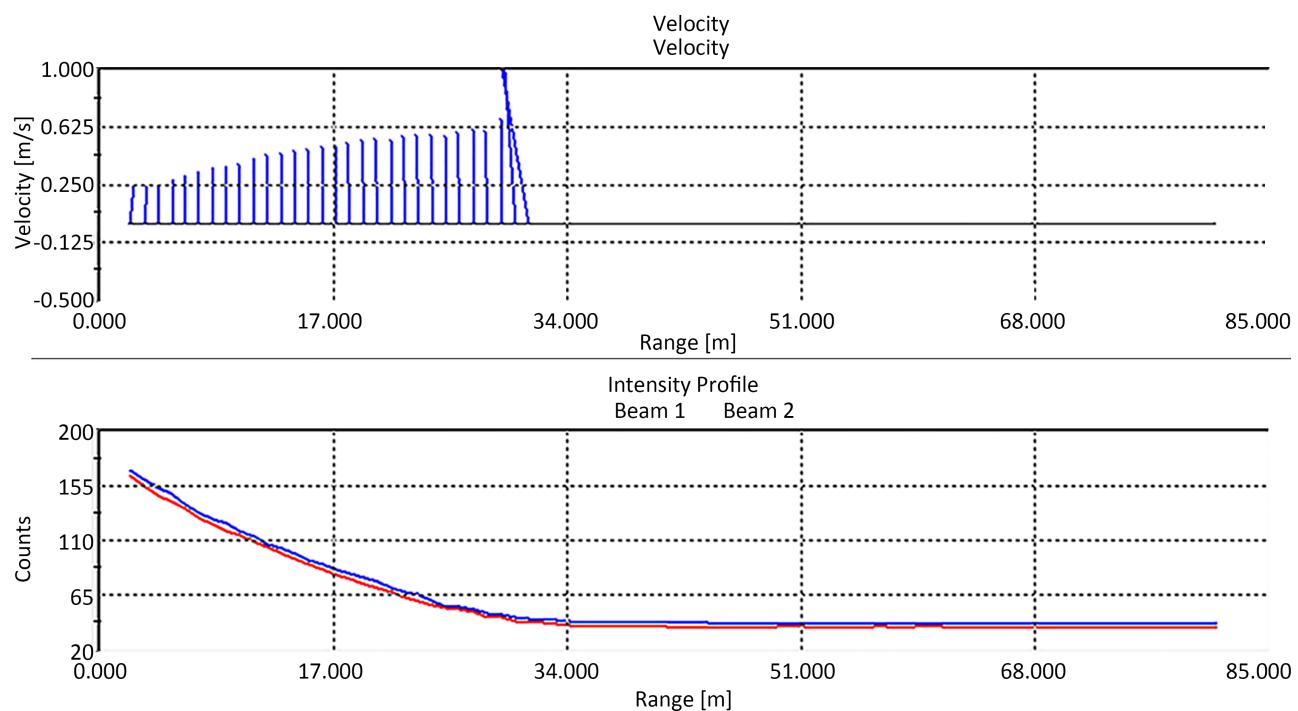


Figure 3. Schematic diagram of velocity distribution and echo intensity of H-ADCP affected by sand content on Sep. 2
图 3. H-ADCP 受含沙量影响流速分布及回波强度示意图(9月2日)

Table 1. Test data of flow meter at Mituoshi Hydrological Station in 2020

表 1. 2020 年弥陀寺站流速仪测验数据

| 序号 | 常规法测次 | 日期 | 开始时间 | 结束时间 | 相应水位 | 流量 | 断面面积 | 平均流速 | H-ADCP 5-41 单元代表流速 | 备注 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|--------------------|------|
| 1 | 35 | 7月3日 | 7:30 | 9:00 | 41.38 | 1000 | 1910 | 0.52 | 0.472 | |
| 2 | 36 | 7月5日 | 10:00 | 11:30 | 41.14 | 817 | 1860 | 0.44 | 0.393 | |
| 3 | 37 | 7月6日 | 11:30 | 13:00 | 41.48 | 1050 | 1940 | 0.54 | 0.470 | |
| 4 | 38 | 7月7日 | 9:30 | 11:00 | 41.41 | 692 | 1930 | 0.36 | 0.343 | |
| 5 | 39 | 7月8日 | 9:30 | 11:00 | 41.40 | 536 | 1930 | 0.28 | 0.266 | |
| 6 | 40 | 7月8日 | 15:00 | 16:00 | 41.42 | 594 | 1930 | 0.31 | 0.296 | |
| 7 | 41 | 7月9日 | 9:00 | 10:40 | 41.20 | 462 | 1880 | 0.25 | 0.234 | 检验样本 |
| 8 | 42 | 7月10日 | 8:50 | 10:50 | 40.69 | 473 | 1760 | 0.27 | 0.238 | 检验样本 |
| 9 | 43 | 7月11日 | 9:00 | 10:40 | 40.10 | 270 | 1610 | 0.17 | 0.218 | 特殊水情 |
| 10 | 44 | 7月12日 | 9:00 | 10:50 | 39.59 | 176 | 1490 | 0.12 | 0.108 | |
| 11 | 45 | 7月13日 | 12:00 | 13:20 | 39.03 | 117 | 1370 | 0.085 | 0.108 | 特殊水情 |
| 12 | 46 | 7月14日 | 18:00 | 19:00 | 39.00 | 430 | 1330 | 0.32 | 0.323 | |
| 13 | 47 | 7月16日 | 9:50 | 11:10 | 40.14 | 921 | 1590 | 0.58 | 0.527 | |
| 14 | 48 | 7月17日 | 9:40 | 11:00 | 40.82 | 1020 | 1760 | 0.58 | 0.587 | |
| 15 | 49 | 7月18日 | 11:00 | 12:20 | 41.58 | 1260 | 1930 | 0.65 | 0.614 | |
| 16 | 50 | 7月19日 | 7:40 | 8:50 | 42.34 | 1440 | 2120 | 0.68 | 0.712 | |

Continued

| | | | | | | | | | |
|----|----|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 17 | 51 | 7月20日 | 10:00 | 11:20 | 42.70 | 1280 | 2160 | 0.59 | 0.564 |
| 18 | 52 | 7月22日 | 17:00 | 18:10 | 42.69 | 1290 | 2150 | 0.60 | 0.591 |
| 19 | 53 | 7月24日 | 10:00 | 11:00 | 43.06 | 1590 | 2240 | 0.71 | 0.657 |
| 20 | 54 | 7月24日 | 22:40 | 23:40 | 43.07 | 1520 | 2240 | 0.68 | 0.629 |
| 21 | 55 | 7月26日 | 9:30 | 10:30 | 42.38 | 1280 | 2050 | 0.62 | 0.577 |
| 22 | 56 | 7月28日 | 16:30 | 17:30 | 42.26 | 1320 | 2020 | 0.65 | 0.617 |
| 23 | 57 | 7月29日 | 17:00 | 18:20 | 42.44 | 1500 | 2060 | 0.73 | 0.651 |
| 24 | 58 | 7月31日 | 11:20 | 13:00 | 42.32 | 1430 | 2030 | 0.70 | 0.613 |
| 25 | 59 | 8月1日 | 17:30 | 18:30 | 41.88 | 1250 | 1930 | 0.65 | 0.588 |
| 26 | 60 | 8月2日 | 12:00 | 13:20 | 41.88 | 1380 | 1930 | 0.72 | 0.650 |
| 27 | 61 | 8月3日 | 15:00 | 16:20 | 41.71 | 1240 | 1910 | 0.65 | 0.588 |
| 28 | 62 | 8月5日 | 10:30 | 12:00 | 41.30 | 1260 | 1810 | 0.70 | 0.645 |
| 29 | 63 | 8月5日 | 14:00 | 15:00 | 41.29 | 1200 | 1810 | 0.66 | 0.631 |
| 30 | 64 | 8月6日 | 14:30 | 15:30 | 40.98 | 1140 | 1740 | 0.66 | 0.600 |
| 31 | 65 | 8月9日 | 9:30 | 11:00 | 40.56 | 1030 | 1640 | 0.63 | 0.610 |
| 32 | 66 | 8月12日 | 11:00 | 12:00 | 40.67 | 1060 | 1670 | 0.63 | 0.660 |
| 33 | 67 | 8月13日 | 18:00 | 19:10 | 41.50 | 1380 | 1870 | 0.74 | 0.682 |
| 34 | 68 | 8月15日 | 7:40 | 9:00 | 41.94 | 1390 | 1970 | 0.71 | 0.654 |
| 35 | 69 | 8月17日 | 9:20 | 10:40 | 42.02 | 1420 | 2000 | 0.71 | 0.650 |
| 36 | 70 | 8月19日 | 10:20 | 11:40 | 42.61 | 1630 | 2160 | 0.75 | 0.668 |
| 37 | 71 | 8月20日 | 15:30 | 17:00 | 42.94 | 1720 | 2230 | 0.77 | 0.639 |
| 38 | 72 | 8月21日 | 14:00 | 15:00 | 43.10 | 1750 | 2280 | 0.77 | 0.648 |
| 39 | 73 | 8月22日 | 10:00 | 11:00 | 43.04 | 1620 | 2260 | 0.72 | 0.623 |
| 40 | 74 | 8月25日 | 9:30 | 10:30 | 43.00 | 1620 | 2240 | 0.72 | 0.612 |
| 41 | 75 | 8月25日 | 19:00 | 20:00 | 42.96 | 1570 | 2210 | 0.71 | 0.635 |
| 42 | 76 | 8月26日 | 18:00 | 19:00 | 42.42 | 1340 | 2080 | 0.64 | 0.469 |
| 43 | 77 | 8月27日 | 18:00 | 19:00 | 41.62 | 1120 | 1860 | 0.60 | 0.390 |
| 44 | 78 | 9月1日 | 18:00 | 19:00 | 40.66 | 1080 | 1640 | 0.66 | 0.591 |
| 45 | 79 | 9月2日 | 14:00 | 15:30 | 40.32 | 975 | 1540 | 0.63 | 0.554 |
| 46 | 80 | 9月5日 | 10:30 | 11:40 | 39.30 | 770 | 1300 | 0.59 | 0.568 |
| 47 | 81 | 9月9日 | 9:30 | 11:40 | 39.34 | 785 | 1300 | 0.60 | 0.588 |
| 48 | 82 | 9月11日 | 10:30 | 11:40 | 38.38 | 464 | 1090 | 0.43 | 0.421 |
| 49 | 83 | 9月13日 | 12:30 | 14:00 | 37.26 | 337 | 848 | 0.40 | 0.433 |
| 50 | 84 | 9月15日 | 10:00 | 11:20 | 37.14 | 336 | 812 | 0.41 | 0.447 |
| 51 | 85 | 9月16日 | 9:00 | 10:20 | 37.73 | 453 | 940 | 0.48 | 0.510 |

Continued

| | | | | | | | | | |
|----|----|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 52 | 86 | 9月17日 | 16:20 | 17:30 | 38.80 | 686 | 1170 | 0.59 | 0.569 |
| 53 | 87 | 9月19日 | 15:20 | 16:40 | 39.11 | 622 | 1240 | 0.50 | 0.512 |
| 54 | 88 | 9月24日 | 13:00 | 14:20 | 39.18 | 725 | 1270 | 0.57 | 0.507 |
| 55 | 89 | 9月26日 | 8:10 | 9:30 | 39.12 | 618 | 1250 | 0.49 | 0.489 |
| 56 | 90 | 9月27日 | 12:10 | 13:20 | 38.54 | 468 | 1120 | 0.42 | 0.455 |
| 57 | 91 | 9月30日 | 12:00 | 13:20 | 37.28 | 232 | 840 | 0.28 | 0.337 |
| 58 | 92 | 10月1日 | 18:30 | 19:30 | 36.10 | 64.0 | 601 | 0.11 | 0.104 |
| 59 | 93 | 10月2日 | 16:30 | 17:30 | 35.40 | 83.5 | 444 | 0.19 | 0.257 |
| 60 | 94 | 10月4日 | 11:00 | 12:10 | 35.26 | 136 | 417 | 0.33 | 0.463 |
| 61 | 95 | 10月5日 | 13:30 | 15:00 | 36.18 | 220 | 614 | 0.36 | 0.419 |
| 62 | 96 | 10月6日 | 11:50 | 13:00 | 37.21 | 322 | 831 | 0.39 | 0.452 |
| 63 | 97 | 10月7日 | 11:50 | 13:00 | 38.11 | 511 | 1030 | 0.50 | 0.522 |

备注：共收集流量比测资料 63 次，去除特殊水情 2 次，高含沙量 7 次，及水位过低 2 次，有效比测样本为 52 次，其中包括检验样本 6 次。

3. 流速关系率定与误差分析

流速关系率定

取缆道流速仪法开始时间与结束时间为比测时段，摘取比测时段内 H-ADCP 每 5 min 采集的各组流速值，取其各单元平均值作为比测代表流速 V1、V2、V3……~V50。

分析 H-ADCP 代表流速与断面平均流速的相关关系，分别采用一个单元、两个单元、……五十个单元等不同单元组合进行平均作为 H-ADCP 断面代表流速(合计有 1275 种方案)，与缆道流速仪法断面平均流速进行回归分析(采用最小二乘法)，确定每种组合方案的回归系数，并对各方案建立的相关关系进行不确定度计算，优选出不确定度满足规范要求的组合方案进行检验。几种常用的流速回归方程如表 2 所示。

Table 2. Several commonly used velocity regression equations [1]

表 2. 几种常用的流速回归方程[1]

| 归方程名称 | 函数关系 | |
|-------|--|------------------------------|
| 一元线性 | $V = a + b \times V_i$ | |
| 一元二次 | $V = a + b \times V_i + c \times V_i^2$ | |
| 幂函数 | $V = a \times V_i^b$ | |
| 复合线性 | $V = a_1 + b_1 \times V_i$ $V = a_2 + b_2 \times V_i$ | $V \leq V_e$ $V \geq V_e$ |
| 二元线性 | $V = a + (b + c \times H) \times V_i$ | |

备注：其中 a 、 b 、 c 为回归系数。

为验证建立的代表流速相关关系可靠性，避免过拟合的情况出现，本次分析将数据分为率定样本与检验样本[4]，通过程序代码随机分配，本次随机预留了 6 次样本数据作为检验样本，预留样本测次为第 41、42、62、

64、95、96 测次。

计算发现，弥陀寺水文站 H-ADCP 采用一元线性、一元二次多项式、幂函数三种方式进行定线时，拟合效果较差，不确定度不符合规范要求，为提高代表流速与断面平均流速拟合精度，本文采用二元线性回归方程，增加水位作为参数(缆道流速仪法测流时段平均水位)，直接通过二元线性回归方程对 1275 种代表流速组合方案进行率定，以最小二乘法为基础算法拟合回归方程，确定回归系数，从所有方案中挑选出不确定度、三性检验均满足规范要求的方案如表 3 所示。

Table 3. Accuracy statistics table of different unit combination schemes (binary linear regression equation)

表 3. 不同单元组合方案精度统计表(二元线性回归方程)

| 方案编号 | 回归方程 | 标准差(%) | a | b | c | 相关系数 | 选用范围 | 单元个数 |
|-------|------|--------|---------|---------|----------|---------|---------|------|
| 230 | 二元线性 | 5.5 | 0.01171 | 0.02765 | -0.10100 | 0.96539 | 5~41 单元 | 37 |
| 239 | 二元线性 | 5.6 | 0.01651 | 0.01605 | 0.32949 | 0.96673 | 5~50 单元 | 46 |
| | | | | | | | | |

备注：合计有 499 种方案标准差小于 6.0%。

对表 3 中第 230、239 方案相关关系进行符号检验、适线检验、偏离数值检验计算，计算结果如表 4 所示。

Table 4. Accuracy statistics table of different analysis schemes

表 4. 不同分析方案精度统计表

| 方案号 | 单元范围 | 方案关系式 | 不确定度(%) | 系统偏差(%) | 最大偏差(%) |
|-----|-----------|---|---------|---------|---------|
| 230 | 第 5~41 单元 | $V = 0.01171 + (-0.101 + 0.02765 \times H_i) \times V_i$ | 11.0 | 0.3 | 16.7 |
| 239 | 第 5~50 单元 | $V = 0.01651 + (0.32949 + 0.01605 \times H_i) \times V_i$ | 11.2 | 0.5 | 15.7 |

利用预留样本对率定关系进行检验，计算结果见表 5，检验误差最大为 11.6%。结果表明，以上方案拟合关系精度效果较好，能够满足水文测验相关要求。

Table 5. Calculation results of inspection samples

表 5. 检验样本计算结果

| 流量测次 | 检验偏差(%) | |
|------|----------|----------|
| | 第 230 方案 | 第 239 方案 |
| 41 | 1.8% | 2.5% |
| 42 | -5.5% | -4.0% |
| 62 | -2.4% | -2.4% |
| 64 | -4.4% | -3.1% |
| 95 | 8.0% | 9.6% |
| 96 | 10.7% | 11.6% |

根据不确定度、系统误差、单次测验最大偏差、预留样本进行检验效果，最终选择采用第 230 方案(即取用

第 5~41 单元数据), 率定代表流速与常规测验断面平均流速相关关系为:

$$V = 0.01171 + (-0.101 + 0.02765 \times H_i) \times V_i \quad (4)$$

三型检验合格, 不确定度 11.0%, 系统误差 0.3%, 精度满足《水文巡测规范》(SL195-2015)高水随机不确定度小于 12%、中水随机不确定度小于 14% 的要求[3], H-ADCP 断面平均流速与断面平均流速相关关系如图 4 所示。

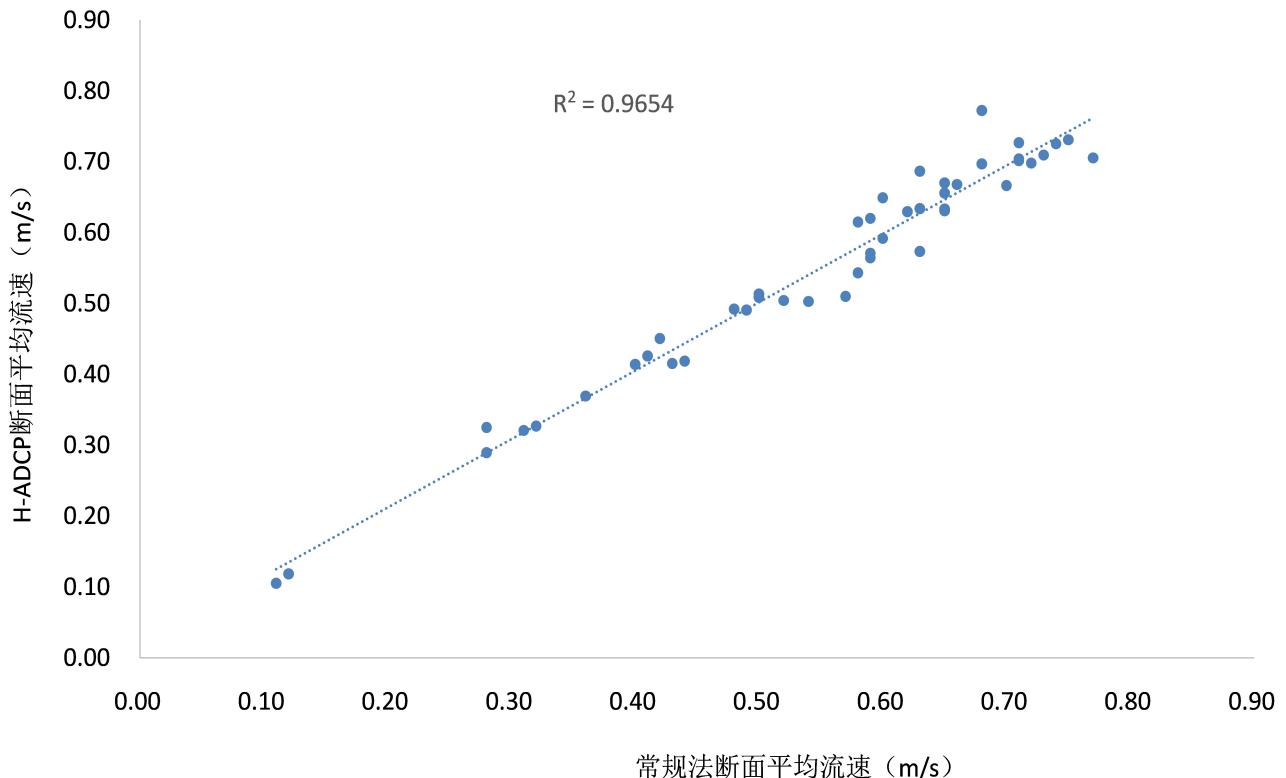


Figure 4. Correlation between average velocity of H-ADCP section and average velocity of section
图 4. H-ADCP 断面平均流速与断面平均流速相关关系

4. 时段整编成果对比

H-ADCP 测验断面面积采用水位 - 面积关系线节点插算法, 通过每次大断面测量成果, 计算出不同水位 Z 的过水断面面积 A, 生成各水位 - 面积结点数据。根据水位数据, 直接读取结点数据中该水位所对应的断面面积, 为尽可能减小因面积查算导致的流量推算误差, 可以通过加密大断面测次的方式, 特别是较大洪峰、较大沙峰期间, 及时施测大断面, 来提高 H-ADCP 推算流量的精度。

根据表 3.2 节中时间段划分, 采用 2020 年 9 月 1 日所测得大断面数据, 以及 7 月 3 日、9 月 24 日缆道流速仪法实测水深数据, 计算水位面积曲线, 分时间段分别采用不同水位面积曲线进行面积查算, 对 2020 年 7 月 19 日至 2020 年 9 月 30 日 H-ADCP 数据进行流量计算, 与弥陀寺站流速仪法连时序整编流量进行对比, 如图 5 所示, 7 月 19 日至 8 月 20 日 H-ADCP 逐时流量过程与流速仪法连时序法推算流量过程线整体变化趋势基本一致。

统计 7 月 19 日至 9 月 30 日期间(去除高含沙量区间 8 月 20 日~9 月 2 日数据)特征值见表 6, 两种测验方式 1 日最大洪量、3 日最大洪量偏差较小, 时段径流量误差为 0.37%, 满足规范不超过 2% 的要求。瞬时最大、瞬时最小流量偏差较大, 主要是两种测验和推算的方法不一样, H-ADCP 是在 5 min 的系列值中挑选特征值, 现行连时序法是在建立水位流量关系后通过水位查读关系线推算流量, 两者相对误差大, 但日均最大流量与日均

最小流量相差较小，逐日平均流量过程线对照如图 6 所示。

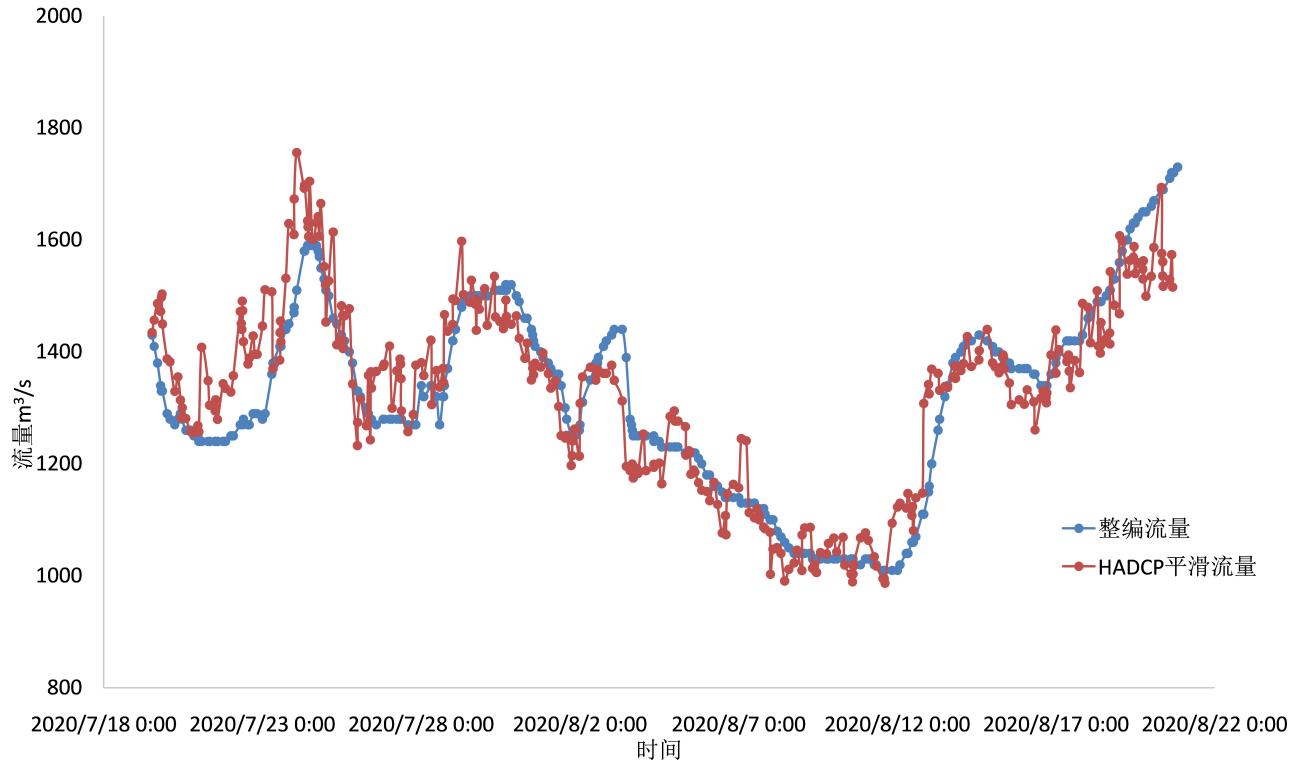


Figure 5. Hourly flow process line from July 19 to August 20
图 5. 7月19日至8月20日逐时流量过程线

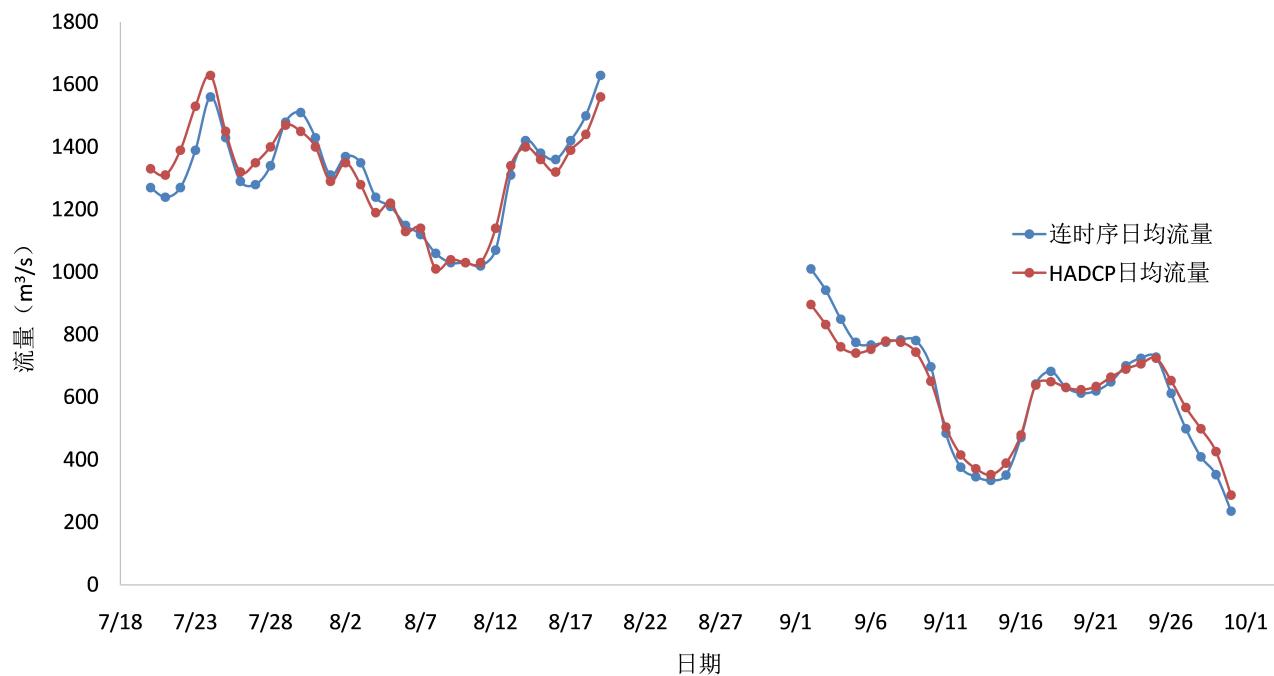


Figure 6. Daily average flow process line from July 19 to September 30
图 6. 7月19日至9月30日逐日平均流量过程线

Table 6. Comparative analysis of characteristic values (July 19 to September 30)**表 6.** 特征值对比分析(7月 19 日至 9月 30 日)

| 类别 | 缆道流速仪法 | H-ADCP | 偏差% |
|---------------------------------|--------|--------|------|
| 瞬时最大流量(m^3/s) | 1730 | 1897 | |
| 瞬时最小流量(m^3/s) | 172 | 202 | |
| 日均最大流量(m^3/s) | 1630 | 1560 | |
| 日均最小流量(m^3/s) | 236 | 287 | |
| 1 日最大洪量(亿 m^3) | 1.408 | 1.408 | 0 |
| 3 日最大洪量(亿 m^3) | 3.931 | 3.983 | 1.30 |
| 时段径流量(亿 m^3) | 50.4 | 50.6 | 0.37 |

5. 结论

弥陀寺水文站利用连时序绳套法定线复杂，通过探索 H-ADCP 在线流量监测方式，采用二元线性定线方式建立代表流速与断面平均流速相关关系，实际有效比测水位范围为 36.10~43.07 m，流量范围为 64.0~1720 m^3/s ，从中优选出第 5~41 单元为代表单元，该区间代表流速与断面平均流速、水位建立二元一次关系，相关关系良好，关系线系统误差为 0.3%，随机不确定度为 11.0%，径流量、次洪量误差较小，推流成果与连时序整编过程线对照较好，各项指标精度符合满足《水文巡测规范》(SL195-2015)定线精度要求(一类精度站，系统误差不超过±2%，高水随机不确定度小于 12%、中水随机不确定度小于 14%的要求)。根据所取用的 H-ADCP 代表单元范围，计算 H-ADCP 可应用的最低相应水位为 35.65 m，因此，在相应水位级 35.65~43.07 m (或流量 64~1720 m^3/s)内可以使用满足规范要求，可以投产使用。

水平式 ADCP 投产使用，可以有效提高流量测验效率和资料整编成果质量，最大限度地减轻外业劳动强度，节省人力物力，进一步推动水文巡测工作的开展。

弥陀寺站大断面河床属于沙质河床，年内有冲淤变化，为减小断面冲淤变化对流量精度的影响，应加密大断面测次，特别是较大洪峰、较大沙峰期间，及时施测大断面，及时更新水位面积关系结点以提高 H-ADCP 流量推算精度。

基金项目

国家自然科学基金联合基金项目(编号：U2040215)。

参考文献

- [1] 韦广龙. 南宁站定点式 ADCP 代表流速与断面平均流速关系模型的建立和应用[J]. 广西水利水电, 2016(2): 17-21.
WEI Guanglong. Development and application of a model describing the relationship between index velocity from H-ADCP and mean cross-section velocity at Nanning Hydrological Station. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2016(2): 17-21. (in Chinese)
- [2] 水利部长江水利委员会水文局. SL337-2006, 声学多普勒流量测验规范[S]. 武汉: 中国水利水电出版社, 2006
Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources of China. SL337-2006, Code for discharge measurement of acoustic Doppler current. Wuhan: China Water & Power Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 水利部长江水利委员会水文局. SL195-2015, 水文巡测规范[S]. 武汉: 中国水利水电出版社, 2015.
Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources of China. SL195-2015, Specification for hydrological tour gauging. Wuhan: China Water & Power Press, 2015. (in Chinese)
- [4] 张红卫. H-ADCP 回归方程拟合及应用系统的研究[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(9): 194-198.
ZHANG Hongwei. Research on H-ADCP regression equation fitting and application system. Computer Technology and Development, 2015, 25(9): 194-198. (in Chinese)